

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-124517

(43)Date of publication of application : 11.05.2001

-----  
-----  
(51)Int.Cl. G01B 11/00  
G01B 11/24  
G06F 17/10  
G06T 3/00

-----  
-----  
(21)Application number : 11-306076 (71)Applicant : MITSUTOYO CORP

(22)Date of filing : 27.10.1999 (72)Inventor : FUJIMOTO IKUMATSU  
OKAMOTO KIYOKAZU

-----  
-----  
(54) DISSOLUTION METHOD FOR GEOMETRIC STRAIN IN IMAGING SPACE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an easily dissolving geometric strain in imaging space to be within a prescribed tolerable error value.

SOLUTION: Affine transformation series, image pickup figure center of image pickup figure on the figure center of reference figure, is determined from a reference space set by a plurality of reference figures and an imaging space obtained by imaging it. In the case the position error after transformation does no fit in a tolerable error value, the reference space is split and affine transformation and space separation are repeated, until the evaluation value of strain on the separated space.

---

LEGAL STATUS [Date of request for examination] 28.09.2006

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

**\* NOTICES \***

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

**CLAIMS**

---

[Claim(s)]

[Claim 1] It is the approach of canceling the geometric distortion of the image pick-up space which picturizes measured space and is obtained. The reference space which has two or more reference graphic forms which were installed in the location equivalent to measured space, and which the coordinate value location of \*\*\*\* of each reference graphic form and the reference original-drawing heart of the whole reference graphic form understands beforehand is prepared. The imprint original-drawing heart which is \*\*\*\* of two or more whole image pick-up graphic forms corresponding to said two or more reference graphic forms in the image pick-up space which picturizes said measured space and is obtained Put on the reference original-drawing heart of said reference space, and to reference Fig. \*\*\*\* which is \*\*\*\* of two or more of said reference graphic forms, respectively The first affine transformation which copies imprint Fig. \*\*\*\* which is \*\*\*\* of two or more of said image pick-up graphic forms is performed. Perform space division which divides said

reference space into two or more first division space, and the position error of each imprint Fig. heart after said first affine transformation and the reference Fig. heart corresponding to it is searched for as a distortion evaluation value about said each first division space. Said first division space is classified into the division space where said distortion evaluation value is settled in a predetermined allowable-error value, and the division space in which it does not fit. As opposed to the division space which is not settled in said allowable-error value to reference Fig. \*\*\*\* of the interior As opposed to the first division space which performs the second affine transformation which copies corresponding imprint Fig. \*\*\*\* of image pick-up space, and is not settled in said allowable-error value after first [ said ] and the second affine transformation The geometric distortion dissolution approach of the image pick-up space which performs space division divided into two or more second division space, and is hereafter characterized by repeating affine transformation and space division until said distortion evaluation value is settled in said allowable-error value about the division space which is not settled in said allowable-error value.

[Claim 2] Said distortion evaluation value is the geometric distortion dissolution approach of the image pick-up space according to claim 1 characterized by considering as the maximum of the norm of the position error of said reference Fig. heart and imprint Fig. heart after said affine transformation.

[Claim 3] Said distortion evaluation value is the geometric distortion dissolution approach of the image pick-up space according to claim 1 characterized by asking said reference Fig. heart for the nearby imprint Fig. heart, and considering as the maximum of the norm of a position error with the imprint Fig. heart corresponding to the nearby imprint Fig. heart and said reference Fig. heart.

[Claim 4] The geometric distortion dissolution approach of the image pick-up space according to claim 1 characterized by determining an affine transformation child with the least square method over the position error of the location after conversion, and the reference Fig. heart corresponding to this in said each affine transformation.

[Claim 5] Said each space division is the geometric distortion dissolution approach of the image pick-up space according to claim 1 characterized by every direction considering as abbreviation 1 / quadrisection of space depended comparatively for 2 minutes.

[Claim 6] Said two or more reference graphic forms are the geometric distortion dissolution approaches of the image pick-up space according to claim 1 characterized by being arranged on one boundary of each division space when a part of the reference Fig. heart divides said reference space or said reference space.

[Claim 7] The geometric distortion dissolution approach of image pick-up space according to claim 1 that one boundary of each reference field which divides said reference space or said reference space, and is obtained is characterized by drawing a rectangle, a triangle, or radii.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the approach of canceling geometric distortion produced to image pick-up space, when the image which picturized measured space with the CCD camera etc. and was obtained performs flat-surface configuration measurement.

[0002]

[Description of the Prior Art] Conventionally, the step of the investigation to the cause of distortion, such as an approach of performing approximation by \*\* dividing polynomial as reference space using a grid-like graphic form as an approach of canceling geometric distortion produced to image pick-up space, a method of performing \*\* whole space-affine transformation, and \*\* lens distortion, is stepped on, and the approach of carrying out the approximation of function etc. is used.

[0003]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, as for this, count cost becomes high, although high degree of accuracy is expectable by the approach of performing approximation by the dividing polynomial of \*\* if a high order polynomial is used. \*\* The method of performing whole space-affine transformation cannot respond to a nonlinear distortion, and cannot expect high degree of accuracy. \*\* The approach of carrying out the approximation of function is not easy to ask for a function, and high degree of accuracy cannot be expected to distortion from which curvature changes a lot locally. Therefore, there was no practical approach of canceling distortion of image pick-up space easily within the assignment allowable error of arbitration conventionally.

[0004] This invention aims at offering the approach of canceling easily the geometric distortion of image pick-up space within a predetermined allowable-error value.

[0005]

[Means for Solving the Problem] This invention is the approach of canceling the geometric distortion of the image pick-up space which picturizes measured space and is obtained. The reference space which has two or more reference graphic forms which were installed in the location equivalent to measured space, and which the coordinate value location of \*\*\*\* of each reference graphic form and the reference original-drawing heart of the whole reference graphic form understands beforehand is prepared. The imprint original-drawing heart which is \*\*\*\* of two or more whole image pick-up graphic forms corresponding to said two or more reference graphic forms in

the image pick-up space which picturizes said measured space and is obtained Put on the reference original-drawing heart of said reference space, and to reference Fig. \*\*\*\* which is \*\*\*\* of two or more of said reference graphic forms, respectively The first affine transformation which copies imprint Fig. \*\*\*\* which is \*\*\*\* of two or more of said image pick-up graphic forms is performed. Perform space division which divides said reference space into two or more first division space, and the position error of each imprint Fig. heart after said first affine transformation and the reference Fig. heart corresponding to it is searched for as a distortion evaluation value about said each first division space. Said first division space is classified into the division space where said distortion evaluation value is settled in a predetermined allowable-error value, and the division space in which it does not fit. As opposed to the division space which is not settled in said allowable-error value to reference Fig. \*\*\*\* of the interior The second affine transformation which copies the location after the first affine transformation of corresponding imprint Fig. \*\*\*\* of image pick-up space is performed. As opposed to the first division space which is not settled in said allowable-error value after first [ said ] and the second affine transformation Space division divided into two or more second division space is performed, and it is characterized by repeating affine transformation and space division until said distortion evaluation value is hereafter settled in said allowable-error value about the division space which is not settled in said allowable-error value.

[0006] According to this invention, the geometric distortion of the image pick-up space which picturizes measured space with a CCD camera etc. and is obtained is easily cancelable with the repeat of affine transformation and space division.

[0007] Let said distortion evaluation value preferably be the maximum of the norm of the position error of said reference Fig. heart and imprint Fig. heart after said affine transformation in this invention. Or said distortion evaluation value can ask said reference Fig. heart for the nearby imprint Fig. heart, and can also make it the maximum of the norm of a position error with the imprint Fig. heart corresponding to the nearby imprint Fig. heart and said reference Fig. heart again. Moreover, in each affine transformation in this invention, an affine transformation child is determined with the least square method over the position error of the location after conversion, and the reference Fig. heart corresponding to this. Furthermore, in this invention, every direction considers space division as abbreviation 1 / quadrisection of space depended comparatively for 2 minutes. Moreover, in this invention, two or more reference graphic forms are arranged on one boundary of each division space when a part of that reference Fig. heart divides said reference space or said reference space, for example. Furthermore, in this invention, one boundary of each reference field which divides reference space or reference space and is obtained shall draw a rectangle, a triangle, or radii.

[0008]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, this invention is explained with reference to a drawing. In advance of the gestalt of concrete operation, the algorithm of a geometric distortion dissolution of the image pick-up space by this invention is explained in order of space division \*\* for storing all position errors in an allowable-error value based on (1) reference space, image pick-up space, the decision of (2) affine transformation types and a distortion evaluation value, and (3) distortion evaluation value.

[0009] (1) As shown in reference space and image pick-up space drawing 1 , prepare the reference space 4 where two or more reference graphic forms 1 were set up. Each reference graphic form 1 has the reference Fig. heart 2 ( $b_k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )) which is \*\*\*\* for which accuracy understands the coordinate location beforehand. Moreover, the heart of the reference graphic form 1 whole shall be the original-drawing heart 3 ( $b_g$ ), and shall understand the coordinate value also for this beforehand. On the other hand, the graphic form corresponding to the reference graphic form 1 is used as the image pick-up graphic form 5 about the image pick-up space 8 which picturized the reference graphic form 1 by CCD, use the heart corresponding to the reference Fig. heart 2 as the imprint Fig. heart 6 ( $a_k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )), and let the heart of the whole image pick-up graphic form corresponding to the reference original-drawing heart 3 be the imprint original-drawing heart 7 ( $a_g$ ). In addition, each reference graphic form 1 of the reference space 4 is arranged on the boundary of division space when a part of the reference Fig. heart 2 performs space division explained later.

[0010] In the relation between such reference space 4 and the image pick-up space 8, as shown in drawing 2 , the original-drawing heart 3 ( $b_g$ ) and the imprint original-drawing heart 7 ( $a_g$ ) are piled up, and affine transformation which copies the imprint Fig. heart 6 to the reference Fig. heart 2 is performed. At this time, it verifies whether this distortion evaluation value epsilon is settled in the predetermined allowable-error value delta considering the maximum of the position error of the location and the corresponding reference Fig. heart 2 after affine transformation as a distortion evaluation value epsilon to all the imprint Fig. hearts 6. Here, in the minimum space (square field surrounded by four adjacent points) when doing  $n$  division of the reference space 4 at the shape of a cross grating, when affine transformation is performed, it is assumed that a group of the reference Fig. heart 2 and a group of the imprint Fig. heart 6 which are surely settled in the appointed allowable-error value are chosen beforehand.

[0011] (2) Set the reference Fig. heart to an affine transformation type and distortion evaluation value epsilononn piece imprint Fig. heart  $a_k=(a_{kx}, a_{ky})$  T to  $b_k=(b_{kx}, b_{ky})$  T, and make an affine transformation child into the one following.

[0012]

[Equation 1]

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ x_3 & x_4 \end{pmatrix}$$

[0013] Here, it is assumed that the coordinate value of each \*\*\*\* is changed into the coordinate value of the system of coordinates which make a zero the imprint original-drawing heart ag and the original-drawing heart bg, respectively. To each k, bk-Aak is considered and Function (x1, x2, x3, x4) f is set with the two following.

[0014]

[Equation 2]

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^n \{ (b_x^k - (a_x^k x_1 + a_y^k x_2))^2 + (b_y^k - (a_x^k x_3 + a_y^k x_4))^2 \}$$

[0015] And the affine transformation child A is determined with the least square method. That is, from  $\Delta f / \Delta x_1 = \Delta f / \Delta x_2 = \Delta f / \Delta x_3 = \Delta f / \Delta x_4 = 0$ , a linear equation with the three following is solved and it asks for the affine transformation child A.

[0016]

[Equation 3]

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n (a_x^k)^2 & \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k & 0 & 0 \\ \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k & \sum_{k=1}^n (a_y^k)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{k=1}^n (a_x^k)^2 & \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \\ 0 & 0 & \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k & \sum_{k=1}^n (a_y^k)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n b_x^k a_x^k \\ \sum_{k=1}^n b_x^k a_y^k \\ \sum_{k=1}^n b_y^k a_x^k \\ \sum_{k=1}^n b_y^k a_y^k \end{pmatrix}$$

[0017] It will become the four following if several 3 is solved.

[0018]

[Equation 4]

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n (a_x^k)^2 \sum_{k=1}^n (a_y^k)^2 - \left( \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \right)^2} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n (a_y^k)^2 \sum_{k=1}^n b_x^k a_x^k - \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \sum_{k=1}^n b_x^k a_y^k \\ - \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \sum_{k=1}^n b_y^k a_x^k + \sum_{k=1}^n (a_x^k)^2 \sum_{k=1}^n b_y^k a_y^k \\ \sum_{k=1}^n (a_y^k)^2 \sum_{k=1}^n b_y^k a_x^k - \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \sum_{k=1}^n b_y^k a_y^k \\ - \sum_{k=1}^n a_x^k a_y^k \sum_{k=1}^n b_y^k a_x^k + \sum_{k=1}^n (a_x^k)^2 \sum_{k=1}^n b_y^k a_y^k \end{pmatrix}$$

[0019] At this time, the affine transformation child A in image pick-up space sets the coordinate value of image pick-up space to (X, Y), and the coordinate value of reference space is expressed with the five following as (x, y).

[0020]

[Equation 5]

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} + \mathbf{b}_s - \mathbf{A} \mathbf{a}_s$$

[0021] As mentioned above, let the amount of position errors of the reference Fig. heart 2 and the imprint Fig. heart 6 after conversion be the distortion evaluation value epsilon. For example, the six following define the distortion evaluation value epsilon of the image pick-up space S as maximum of the norm of the position error of the reference Fig. heart and the imprint Fig. heart after affine transformation.

[0022]

[Equation 6]

Epsilon=sup||Aa-b||a\*\*S [0023] Here, norm ||-|| is defined as follows.

[0024]

[Equation 7]

$$\text{任意の } \mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_x \\ \mathbf{c}_y \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2 \text{ に対して}$$

$$\| \mathbf{c} \| = \frac{1}{2} ( | \mathbf{c}_x + \mathbf{c}_y | + | \mathbf{c}_x - \mathbf{c}_y | )$$



[0025] Moreover, let  $b$  be the reference Fig. heart of the reference space corresponding to imprint Fig. heart  $a \in S$ . In addition, in other examples of the distortion evaluation value  $\epsilon$ , the following definitions are also considered by using  $a$  as the imprint Fig. heart like the above, using  $b$  as the reference Fig. heart. That is,  $a$  and  $x$  which becomes  $x \in S$  are the cases where consider a nearby imprint location to the reference Fig. heart which makes  $\|Ax-b\|$  min, and it is defined as it as follows as the imprint Fig. heart of the point corresponding to this nearby imprint location and reference Fig. heart, and maximum of a position error.

[0026]

[Equation 8]

$$\epsilon = \sup_{a \in S} \| \bar{x} - a \| \quad ( \bar{x} : \text{最寄りの転写位置} )$$

[0027] However, an argument here shall use the distortion evaluation value  $\epsilon$  shown in several 6. If it does not judge and enter [ whether this distortion evaluation value  $\epsilon$  enters in the predetermined allowable-error value  $\delta$ , and ], image pick-up space (reference space) is divided, and the next affine transformation is performed to the divided image pick-up space. Hereafter, a repeat is performed for the same processing until the distortion evaluation value  $\epsilon$  enters in the predetermined allowable-error value  $\delta$ , and geometric distortion is canceled.

[0028] (3) -- the space division for storing a position error  $\epsilon$  in the allowable-error value  $\delta$  -- as mentioned above, the reference Fig. heart to  $n$  imprint Fig. heart  $a_k=(a_{kx}, a_{ky}) \in S$  is set to  $b_k=(b_{kx}, b_{ky}) \in T$ , and an affine transformation child is expressed with several 1, and the location of the original-drawing heart [ in / for the imprint Fig. heart of image pick-up space /  $b_g$  and reference space ] is set with  $a_g$ , and the step of space division is as follows.

[0029] (The 1st step) As shown in drawing 1, it asks for the first affine transformation child  $A_0$  by the approach mentioned above from reference Fig. heart  $2:b_k=(b_{kx}, b_{ky})$  and corresponding imprint Fig. heart  $6:a_k=(a_{kx}, a_{ky})$  of the whole space  $S$  of the reference space  $4(a_{kx}, a_{ky})$ .

[0030] (The 2nd step) As shown in drawing 3 A, let division space by the first division of the reference space  $4$  be  $S_1, S_2, S_3$ , and  $S_4$ . In this example, space division is quadrisection of the space where every direction is divided abbreviation  $1/2$ , and becomes, as a division boundary line passes along the reference Fig. heart 2 top. At this time, a part of reference Fig. heart 2 is on the boundary of each division space (a reference field or reference space), the boundary of each reference field draws a rectangle (square or rectangle), and that outermost frame constitutes the reference space  $4$ . However, a setup of reference space on which the boundary of

each reference field in reference space or reference space draws radii or a triangle is also possible. The division space of the image pick-up space 8 corresponding to the first division space S1 of this reference space 4 – S4 is S1'–S4' as shown in drawing 3 B. Since such division space corresponds to one to one, paying attention to the division space of reference space, it explains below.

[0031] such division space is alike, respectively, it receives and the primary maximum of the position error of the imprint Fig. heart after conversion and the reference Fig. heart corresponding to this is classified into the division space settled in the predetermined allowable-error value delta in division space, and the division space in which it does not fit as distortion evaluation value epsilon<sub>k</sub> (k= 1, 2, 3, 4). Since the distortion evaluation value epsilon is settled in the allowable-error value delta in the division space S1 among the space S1 – S4 which were quadrisected in the example of drawing 3, distortion amendment is possible at the first affine transformation child A0. That is, in the division space S1, the further division does not have the need and the amendment to which a position error is settled in the assignment allowable-error value delta is attained by the following affine transformation type.

[0032]

[Equation 9]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + b_0 - A_0 a_0$$

[0033] The distortion evaluation value epsilon progresses to the following step about the remaining division space S2 and S3 and S4 which are not settled in the allowable-error value delta.

(The 3rd step) It is already changed by the first affine transformation child A0 also about such division space S2 and S3 and S4. At this time, not a but A0a is used for the imprint Fig. heart of the imprint Fig. heart by the decision of an affine transformation type, and evaluation of distortion. In the following arguments, the division space S2 is taken for an example. That is, in the decision of an affine transformation type, Function (x1, x2, x3, x4) f is set with the ten following instead of bk–A<sub>k</sub> using bk–A (A0ak), and the affine transformation child A is determined with the least square method.

[0034]

[Equation 10]

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^n \{ (b_x^k - (\tilde{a}_x^k x_1 + \tilde{a}_y^k x_2))^2 + (b_y^k - (\tilde{a}_x^k x_3 + \tilde{a}_y^k x_4))^2 \}$$

$$\text{但し } A_0 a^k = \begin{pmatrix} \tilde{a}_x^k \\ \tilde{a}_y^k \end{pmatrix} \text{ とする.}$$

[0035] Moreover, the distortion evaluation value epsilon is calculated by the 11 following.

[0036]

[Equation 11]

Epsilon=sup||A (A0a)-b||a\*\*S2 [0037] In this way, when the obtained affine transformation child A is set to A1, affine transformation child A (2) in the division space S2 is expressed with a degree type.

[0038]

[Equation 12]

$$\text{任意の } \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \in S_1 \text{ に対して}$$

$$A^{(2)} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = A_1 \left[ A_0 \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \right] = (A_1 A_0) \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

[0039] Therefore, A(2)=A1A0 is materialized. This affine transformation child A (2) is composition of the first affine transformation child A0 in the image pick-up whole space, and two transformation quantities of the second affine transformation child A1 in the first-divided division space S2. Here, as shown in drawing 3 A and B, it is the second division (also in this case) further about the division space S2. Every direction is abbreviation 1 / quadrisection of space depended comparatively for 2 minutes, and the reference Fig. heart 2 carries out it together with a division boundary top. Distortion evaluation value epsilon<sub>k</sub> after the first and second convolution transformation (k= 1, 2, 3, 4) classifies the obtained second division space S21-S24 into the division space S21 and S24 settled in the assignment allowable-error value delta, and the division space S22 and S23 in which it does not fit. Distortion

amendment is possible by affine transformation child A (2) in the division space S21 and S24 settled in the allowable-error value delta. To the division space S22 and S23 which is not settled in the allowable-error value delta, the still more nearly same division is repeated below. Generally by the above, space  $S_{x_1 \times 2}$  and -- which were divided the n-th order, and affine transformation child A (n) in  $x_n$  ( $x_k = 1, 2, 3, 4, k = 1, 2, \dots, n$ ) become like a degree type.

[0040]

[Equation 13]

$$\text{任意の} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \in S_{x_1 \times 2, \dots, x_n} \text{ に対して}$$

$$A^{(n)} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = (A_{n-1} \dots A_0) \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

[0041] Distortion is made to cancel by making this affine transformation child A (n) act. By stepping on the above step [ the 1st to 3rd ], it becomes possible to store a position error in the assignment allowable-error value delta in respect of [ all ] image pick-up space.

[0042] The gestalt of the operation which applied the algorithm concretely mentioned above to the flat-surface configuration gaging system is explained. Drawing 4 shows the interference fringe metering device by the phase shift method which picturizes an interference fringe image using CCD cameras 412a, 412b, and 412c of plurality (in the case of drawing three pieces), and measures a flat-surface configuration. The principle of such a coincidence metering device of a phase shift interference fringe is proposed by JP,2-287107,A etc. A beam is expanded with a lens 402, and the coherent light bundle from a laser light source 401 is collimated by the collimate lens 404 through the non-polarization beam splitter 403, and is irradiated by the reference side 405. the reference side 405 -- a part -- reflection -- it is transparency a part and the transmitted light flux is further irradiated by the specimen plane 407 through the quarter-wave length plate 406.

[0043] The reflected light of the reference side 405 and a specimen plane 407 is piled up as the hands-off flux of light the flux of light and polarization cross at right angles

with the quarter-wave length plate 406 (namely, 180 phase contrast), and is reflected by the beam splitter 406. This hands-off flux of light is the circular polarization of light flux of light which has the flat-surface configuration information on a specimen plane 407 in the form of the difference of the phase of the reflected light (sample light) of a specimen plane 407 to the phase of the reflected light (reference beam) from the reference side 405. two non-polarization beam splitters 408a and 408b and total reflection mirror 408c divide this hands-off flux of light every  $[2/1]$  one by one -- having -- three spectra -- it goes into optical system 40a, 40b, and 40c.

[0044] a spectrum -- for example, quarter-wave length plate 409a for optical system 40a and 40b to give phase contrast to the three hands-off flux of lights by a unit of 90 degrees, and 1/2 wavelength-plate 409b -- having -- moreover -- each -- a spectrum -- optical system 40a, 40b, and 40c -- each -- a spectrum -- it has the polarizing plates 410a, 410b, and 410c for making phase contrast information on the flux of light into interference fringe information on the strength. As for these polarizing plates 410a, 410b, and 410c, the polarization direction inclines by a unit of 45 degrees. thereby -- each -- a spectrum -- three interference images of sample light and a reference beam which carried out the phase shift every  $[90]$  are picturized by CCD cameras 412a, 412b, and 412c of optical system 40a, 40b, and 40c. in addition, the attenuation plates 411a and 411b -- each -- a spectrum -- it is inserted in order to keep equal the light-receiving reinforcement in optical system 40a, 40b, and 40c.

[0045] Three interference fringe information that the phases picturized by CCD cameras 412a, 412b, and 412c differ is inputted into an image processing system 413, is controlled by the control computer 414 and the monitor 415, and computes the configuration information on a specimen plane 407 by the predetermined operation. In the case of the gestalt of this operation, the interference fringe information  $II(x, y)$  is concretely acquired from three CCD cameras 412a, 412b, and 412c to each location  $(x, y)$  of image pick-up space, respectively, but Since geometric distortion arises to image pick-up space by the optical element prefaced by each CCD cameras 412a, 412b, and 412c and them, the interference fringe information  $II(x, y)$  on each location  $(x, y)$  of image pick-up space is not necessarily the interference information over the same location. Then, it is necessary to cancel a geometric distortion, and to add amendment so that the interference fringe information  $II(x, y)$  on each location  $(x, y)$  of an image pick-up image may turn into interference information over the same location of a specimen plane 407.

[0046] Then, the algorithm of (1) - (3) mentioned above is applied. An affine transformation type  $[in / for three image pick-up space \models 1 \text{ and } 2 \text{ or } 3 \text{ division space which were obtained } / \text{ each division space}]$  is set like the following type as  $Slk(k=1, \dots, nl)$ .

[0047]

[Equation 14]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = A^{-1}_k \begin{bmatrix} X^1 \\ Y^1 \end{bmatrix} + b^{-1}_{s^k} - A^{-1}_k a^{-1}_{s^k}$$

[0048] It sets to several 14 and they are blgk and algk. The original-drawing heart in Slk (k= 1, --, nl) and the imprint original-drawing heart are expressed, respectively. Next, each coordinate value (XI, YI) of three image pick-up space I corresponding to each coordinate value (x y) of reference space is given by the following formula.

[0049]

[Equation 15]

$$\begin{bmatrix} X^1 \\ Y^1 \end{bmatrix} = A^{-1}_k \left( \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - b^{-1}_{s^k} + A^{-1}_k a^{-1}_{s^k} \right) \quad (X^1, Y^1) \in S^{-1}_k$$

[0050] Therefore, the interference information on three image pick-up space I corresponding to each location (x y) of a specimen plane 407 is given for the interference fringe information II (XI, YI) in the coordinate value (XI, YI) calculated in the top. The interference fringe information on three image pick-up equipments corresponding to the location where a specimen plane is the same (value on the strength [ optical ]) which canceled the geometric distortion of a CCD image pick-up image as mentioned above is acquired.

[0051]

[Effect of the Invention] As stated above, according to this invention, the geometric distortion by measured space and CCD image pick-up space can be easily canceled within a predetermined allowable-error value, and highly precise-ization of the flat-surface shape-measurement Sagitta label location measurement using two or more optical system and a corresponding CCD camera etc. can be expected. Moreover, since what is necessary is just to make it act on each field in the phase of the beginning of processing of that affine transformation child of image information whenever it makes the preparations on which a final affine transformation child is made to act for every field and obtains image pick-up image information according to this invention unless optical system and an image pick-up system are changed, also in time, there is little count cost and it ends.

---

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is drawing showing the relation between the reference space in this invention, and image pick-up space.

[Drawing 2] It is drawing showing the relation between the affine transformation in this invention, and an allowable-error value.

[Drawing 3 A] It is drawing showing the example of the space division of the reference space in this invention.

[Drawing 3 B] It is drawing showing the example of the space division of image pick-up space similarly.

[Drawing 4] It is drawing showing the interference fringe image image pick-up system by which this invention is applied.

[Description of Notations]

1 [ -- Reference space, 5 / -- An image pick-up graphic form, 6 / -- The imprint Fig. heart, 7 / -- The imprint original-drawing heart, 8 / -- Image pick-up space. ] -- A reference graphic form, 2 -- The reference Fig. heart, 3 -- The reference original-drawing heart, 4

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2001-124517  
(P2001-124517A)

(43)公開日 平成13年5月11日(2001.5.11)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マコ-ト*(参考)
G 0 1 B	11/00	G 0 1 B 11/00	H 2 F 0 6 5
	11/24	11/24	K 5 B 0 5 6
G 0 6 F	17/10	G 0 6 F 15/31	Z 5 B 0 5 7
G 0 6 T	3/00	15/66	3 6 0

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 8 頁)

(21)出願番号 特願平11-306076

(22)出願日 平成11年10月27日(1999. 10. 27)

(71)出願人 000137694

株式会社ミットヨ

神奈川県川崎市高津区坂戸一丁目20番1号

(72)発明者 藤本 生松

茨城県つくば市上横場430番地の1 株式  
会社ミットヨ内

(72)発明者 岡本 清和

茨城県つくば市上横場430番地の1 株式  
会社ミットヨ内

(74)代理人 100092820

弁理士 伊丹 勝

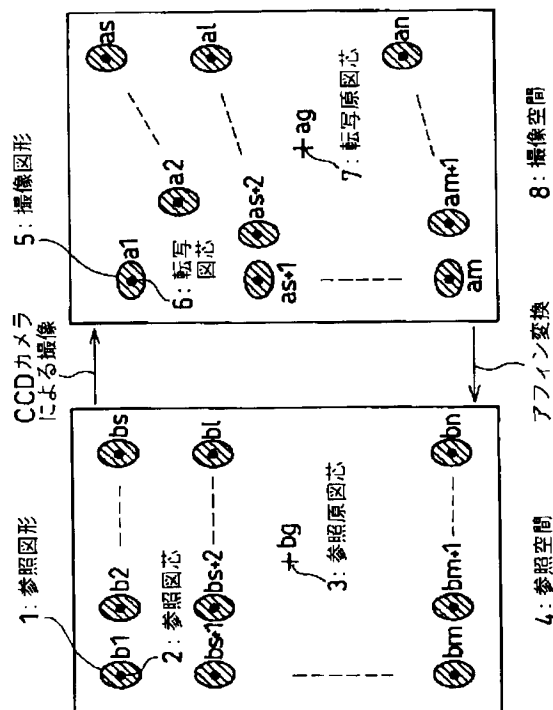
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 撮像空間の幾何学的歪み解消方法

(57)【要約】

【課題】 撮像空間の幾何学的歪みを所定の許容誤差値内で容易に解消できる方法を提供する。

【解決手段】 複数の参照図形が設定された参照空間と、これを撮像して得られた撮像空間とから、参照図形の図芯に撮像図形の図芯を写すアフィン変換列を決定し、変換後の位置誤差が許容誤差値内に収まらない場合には参照空間を分割して、以下、許容誤差値内に収まらない分割空間について歪み評価値が許容誤差値内に収まるまでアフィン変換と空間分割を繰り返す。





**【特許請求の範囲】**

**【請求項 1】** 被計測空間を撮像して得られる撮像空間の幾何学的歪みを解消する方法であって、被計測空間と同等の位置に設置された、各参照図形の図芯と参照図形全体の参照原図芯の座標値位置が予めわかっている複数の参照図形を有する参照空間を準備し、前記被計測空間を撮像して得られる撮像空間内の前記複数の参照図形に対応する複数の撮像図形全体の図芯である転写原図芯を、前記参照空間の参照原図芯に重ね、前記複数の参照図形の図芯である参照図芯群にそれぞれ、前記複数の撮像図形の図芯である転写図芯群を写す第 1 次アフィン変換を行い、前記参照空間を複数の第 1 次分割空間に分ける空間分割を施し、前記各第 1 次分割空間について前記第 1 次アフィン変換後の各転写図芯とそれに対応する参照図芯との位置誤差を歪み評価値として求め、前記第 1 次分割空間を、前記歪み評価値が所定の許容誤差値内に収まる分割空間と収まらない分割空間とに分類し、前記許容誤差値内に収まらない分割空間に対してその内部の参照図芯群に、対応する撮像空間の転写図芯群を写す第 2 次アフィン変換を行い、前記第 1 次及び第 2 次アフィン変換後の前記許容誤差値内に収まらない第 1 次分割空間に対しては、複数の第 2 次分割空間に分ける空間分割を施し、以下、前記許容誤差値内に収まらない分割空間について前記歪み評価値が前記許容誤差値内に収まるまでアフィン変換と空間分割を繰り返すことを特徴とする撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 2】** 前記歪み評価値は、前記参照図芯と前記アフィン変換後の転写図芯との位置誤差のノルムの最大値とすることを特徴とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 3】** 前記歪み評価値は、前記参照図芯に最寄りの転写図芯を求め、その最寄りの転写図芯と前記参照図芯に対応する転写図芯との位置誤差のノルムの最大値とすることを特徴とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 4】** 前記各アフィン変換においては、変換後の位置とこれに対応する参照図芯との位置誤差に対する最小二乗法によりアフィン変換子を決定することを特徴とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 5】** 前記各空間分割は、縦横共に略 1/2 分割による空間の 4 分割とすることを特徴とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 6】** 前記複数の参照図形は、その参照図芯の一部が前記参照空間或いは前記参照空間を分割した時の各分割空間のいずれかの境界上に配置されることを特徴

とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【請求項 7】** 前記参照空間或いは前記参照空間を分割して得られる各参照領域のいずれかの境界が矩形、三角形、円弧のいずれかを描くことを特徴とする請求項 1 記載の撮像空間の幾何学的歪み解消方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

**【発明の属する技術分野】** この発明は、被計測空間を CCD カメラ等により撮像して得られた画像により平面形状測定を行う場合等において、撮像空間に生じる幾何学的歪みを解消する方法に関する。

**【0002】**

**【従来の技術】** 従来、撮像空間に生じる幾何学的歪みを解消する方法として、参照空間として格子状の図形を利用して、①区分的多項式による近似を行う方法、②全空間的なアフィン変換を施す方法、③レンズ収差等の歪みの原因に対する調査のステップを踏み、関数近似する方法、等が用いられている。

**【0003】**

**【発明が解決しようとする課題】** しかし、①の区分的多項式による近似を行う方法では、高次多項式を利用すれば高精度が期待できるが、これは計算コストが高くなる。②の全空間的なアフィン変換を行う方法は、非線形な歪みに対応できず、高精度が期待できない。③の関数近似する方法は、関数を求めるのが容易ではなく、局所的に大きく曲率が変わるような歪みに対しては高精度が期待できない。従って従来、任意の指定許容誤差内で撮像空間の歪みを容易に解消できるような実用的な方法はなかった。

**【0004】** この発明は、撮像空間の幾何学的歪みを所定の許容誤差値内で容易に解消できる方法を提供することを目的としている。

**【0005】**

**【課題を解決するための手段】** この発明は、被計測空間を撮像して得られる撮像空間の幾何学的歪みを解消する方法であって、被計測空間と同等の位置に設置された、各参照図形の図芯と参照図形全体の参照原図芯の座標値位置が予めわかっている複数の参照図形を有する参照空間を準備し、前記被計測空間を撮像して得られる撮像空間内の前記複数の参照図形に対応する複数の撮像図形全体の図芯である転写原図芯を、前記参照空間の参照原図芯に重ね、前記複数の参照図形の図芯である参照図芯群にそれぞれ、前記複数の撮像図形の図芯である転写図芯群を写す第 1 次アフィン変換を行い、前記参照空間を複数の第 1 次分割空間に分ける空間分割を施し、前記各第 1 次分割空間について前記第 1 次アフィン変換後の各転写図芯とそれに対応する参照図芯との位置誤差を歪み評価値として求め、前記第 1 次分割空間を、前記歪み評価値が所定の許容誤差値内に収まる分割空間と収まらない

い分割空間とに分類し、前記許容誤差値内に収まらない分割空間に対してその内部の参照図芯群に、対応する撮像空間の転写図芯群の第 1 次アフィン変換後の位置を写す第 2 次アフィン変換を行い、前記第 1 次及び第 2 次アフィン変換後の前記許容誤差値内に収まらない第 1 次分割空間に対しては、複数の第 2 次分割空間に分ける空間分割を施し、以下、前記許容誤差値内に収まらない分割空間について前記歪み評価値が前記許容誤差値内に収まるまでアフィン変換と空間分割を繰り返すことを特徴とする。

【0006】この発明によると、被計測空間を CCD カメラ等により撮像して得られる撮像空間の幾何学的歪みを、アフィン変換と空間分割の繰り返しにより容易に解消することができる。

【0007】この発明において、前記歪み評価値は好ましくは、前記参照図芯と前記アフィン変換後の転写図芯との位置誤差のノルムの最大値とする。或いはまた、前記歪み評価値は、前記参照図芯に最寄りの転写図芯を求め、その最寄りの転写図芯と前記参照図芯に対応する転写図芯との位置誤差のノルムの最大値とすることもできる。またこの発明における各アフィン変換においては例えば、変換後の位置とこれに対応する参照図芯との位置誤差に対する最小二乗法によりアフィン変換子を決定する。更にこの発明において、空間分割は例えば、縦横共に略 1/2 分割による空間の 4 分割とする。またこの発明において、複数の参照図形は例えば、その参照図芯の一部が前記参照空間或いは前記参照空間を分割した時の各分割空間のいずれかの境界上に配置される。更にこの発明において、参照空間或いは参照空間を分割して得られる各参照領域のいずれかの境界は例えば矩形、三角形、円弧のいずれかを描くものとする。

【0008】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して、この発明を説明する。具体的な実施の形態に先立ち、この発明による撮像空間の幾何学的歪み解消のアルゴリズムを、

(1) 参照空間と撮像空間、(2) アフィン変換式の決定と歪み評価値、(3) 歪み評価値に基づいて全ての位置誤差を許容誤差値内に収めるための空間分割、の順に説明する。

【0009】(1) 参照空間と撮像空間

図 1 に示すように、複数の参照図形 1 が設定された参照空間 4 を準備する。各参照図形 1 は、予め座標位置が正確にわかっている図芯である参照図芯 2 ( $b_k$  ( $k =$

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^n \{ (b_x^k - (a_x^k x_1 + a_y^k x_2))^2 + (b_y^k - (a_x^k x_3 + a_y^k x_4))^2 \}$$

【0015】そして、最小二乗法によりアフィン変換子 A を決定する。即ち、 $\delta f / \delta x_1 = \delta f / \delta x_2 = \delta f / \delta x_3 = \delta f / \delta x_4 = 0$  より、下記数 3 の線形方程式

1, 2, ..., n) を有する。また参照図形 1 全体の芯は原図芯 3 ( $b_g$ ) であり、これも予め座標値がわかっているものとする。これに対して、参照図形 1 を CCD で撮像した撮像空間 8 について、参照図形 1 に対応する図形を撮像図形 5 とし、参照図芯 2 に対応する芯を転写図芯 6 ( $a_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ )) とし、参照原図芯 3 に対応する撮像図形全体の芯を転写原図芯 7

( $a_g$ ) とする。なお参照空間 4 の各参照図形 1 は、その参照図芯 2 の一部が、後に説明する空間分割を行ったときの分割空間の境界上に配置されるようになっている。

【0010】この様な参照空間 4 と撮像空間 8 の関係において、図 2 に示すように、原図芯 3 ( $b_g$ ) と転写原図芯 7 ( $a_g$ ) を重ね合わせて、参照図芯 2 に転写図芯 6 を写すアフィン変換を行う。このとき、全ての転写図芯 6 に対して、アフィン変換後の位置とその対応する参照図芯 2 との位置誤差の最大値を歪み評価値  $\varepsilon$  として、この歪み評価値  $\varepsilon$  が所定の許容誤差値  $\delta$  に収まるか否かの検証を行う。ここで、参照空間 4 を二次元格子状に  $n$  分割した時の最小空間 (隣り合う 4 点で囲まれる四角形領域) においては、アフィン変換を施したとき、必ず指定の許容誤差値に収まるような参照図芯 2 の群と転写図芯 6 の群が予め選ばれていると仮定する。

【0011】(2) アフィン変換式と歪み評価値  $\varepsilon$   
 $n$  個の転写図芯  $a^k = (a_x^k, a_y^k)^T$  に対する参照図芯を、 $b^k = (b_x^k, b_y^k)^T$  とし、アフィン変換子を下記数 1 とする。

【0012】

【数 1】

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ x_3 & x_4 \end{bmatrix}$$

【0013】ここで、各図芯の座標値は、転写原図芯  $a_g$ 、原図芯  $b_g$  を原点とする座標系の座標値にそれぞれ変換されていると仮定する。各  $k$  に対して、 $b_k - A a_k$  を考えて、関数  $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$  を下記数 2 とおく。

【0014】

【数 2】

を解いてアフィン変換子 A を求める。

【0016】

【数 3】

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (a_x^i)^2 & \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i & \sum_{i=1}^n (a_y^i)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (a_x^i)^2 & \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i & \sum_{i=1}^n (a_y^i)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n b_x^i a_x^i \\ \sum_{i=1}^n b_y^i a_x^i \\ \sum_{i=1}^n b_x^i a_y^i \\ \sum_{i=1}^n b_y^i a_y^i \end{pmatrix}$$

【0017】数3を解くと、下記数4となる。

【数4】

【0018】

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (a_x^i)^2 \sum_{i=1}^n (a_y^i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \right)^2} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (a_y^i)^2 \sum_{i=1}^n b_x^i a_x^i - \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \sum_{i=1}^n b_x^i a_y^i \\ - \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \sum_{i=1}^n b_y^i a_x^i + \sum_{i=1}^n (a_x^i)^2 \sum_{i=1}^n b_y^i a_y^i \\ \sum_{i=1}^n (a_y^i)^2 \sum_{i=1}^n b_y^i a_x^i - \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \sum_{i=1}^n b_y^i a_y^i \\ - \sum_{i=1}^n a_x^i a_y^i \sum_{i=1}^n b_x^i a_x^i + \sum_{i=1}^n (a_x^i)^2 \sum_{i=1}^n b_y^i a_y^i \end{pmatrix}$$

【0019】このとき、撮像空間におけるアフィン変換子Aは、撮像空間の座標値を(X, Y)とし、参照空間の座標値を(x, y)として、下記数5で表される。

【0024】

【数7】

【0020】

【数5】

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + b - A a$$

$$\text{任意の } c = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \text{ に対して}$$

$$\|c\| = \frac{1}{2} (|c_x + c_y| + |c_x - c_y|)$$

【0021】前述のように、参照図芯2と変換後の転写図芯6との位置誤差量を歪み評価値εとする。例えば、撮像空間Sの歪み評価値εは、参照図芯とアフィン変換後の転写図芯との位置誤差のノルムの最大値として、下記数6で定義する。

【0022】

【数6】

$$\varepsilon = \sup \|Aa - b\|$$

$$a \in S$$

【0023】ここで、ノルム $\|\cdot\|$ は次のように定義する。

$$\varepsilon = \sup_{a \in S} \|\bar{x} - a\| \quad (\bar{x} : \text{最寄りの転写位置})$$

【0027】但し、ここでの議論は、数6に示す歪み評価値εを用いるものとする。この歪み評価値εが所定の許容誤差値δ内に入るか否かを判定し、入らなければ撮像空間(参照空間)の分割を行って、分割された撮像空間に対して次のアフィン変換を施す。以下、歪み評価値εが所定の許容誤差値δ内に入るまで同様の処理を繰り返す。

【0025】また、bを転写図芯a∈Sに対応する参照空間の参照図芯とする。なお歪み評価値εの他の例では、上記と同様にbを参照図芯、aを転写図芯として、次のような定義も考えられる。即ち、a, x∈Sなるxが、 $\|Ax - b\|$ を最小とする参照図芯に最寄りの転写位置を考えて、この最寄りの転写位置と参照図芯に対応する先の転写図芯と位置誤差の最大値として、次のように定義する場合である。

【0026】

【数8】

返しを行い、幾何学的歪みを解消する。

【0028】(3) 位置誤差εを許容誤差値δ内に収めるための空間分割

前述のように、n個の転写図芯 $a^k = (a_{kx}, a_{ky})^T$ に対する参照図芯を、 $b^k = (b_{kx}, b_{ky})^T$ とし、アフィン変換子数を1で表し、且つ撮像空間の転写図芯を

$b_g$ 、参照空間における原図芯の位置を  $a_g$  とおいて、空間分割のステップは次のようになる。

【0029】（第1ステップ）図1に示すように、参照空間4の全空間  $S$  の参照図芯2： $b^k = (b_x^k, b_y^k)$  とその対応する転写図芯6： $a^k = (a_x^k, a_y^k)$  とから、上述した方法により第1次アフィン変換子  $A_0$  を求める。

【0030】（第2ステップ）図3Aに示すように、参照空間4の第1次分割による分割空間を、 $S_1, S_2, S_3, S_4$  とする。この例では空間分割は、参照図芯2上を分割境界線が通るように、縦横共に略1/2分割してなる空間の4分割である。このとき参照図芯2の一部は、各分割空間（参照領域或いは参照空間）の境界上にあり、各参照領域の境界は矩形（正方形又は或いは長方形）を描き、その最外枠が参照空間4を構成する。但し、参照空間或いは参照空間内の各参照領域の境界が円弧或いは三角形を描くような参照空間の設定も可能である。この参照空間4の第1次分割空間  $S_1 \sim S_4$  に対応する撮像空間8の分割空間は、図3Bに示すように、 $S_1' \sim S_4'$  である。これらの分割空間は一対一に対応するので、以下参照空間の分割空間に着目して説明する。

【0031】これらの分割空間のそれぞれに対して、変換後の転写図芯とこれに対応する参照図芯との位置誤差の最大値を歪み評価値  $\varepsilon_k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) とし、分割空間を、所定の許容誤差値  $\delta$  に収まる分割空間と収まらない分割空間とに1次分類する。図3の例で

は、4分割した空間  $S_1 \sim S_4$  のうち、分割空間  $S_1$  では歪み評価値  $\varepsilon$  が許容誤差値  $\delta$  内に収まっているので、第1次アフィン変換子  $A_0$  で歪み補正が可能である。即ち、分割空間  $S_1$  では、更なる分割は必要がなく、次のアフィン変換式により、位置誤差が指定許容誤差値  $\delta$  内に収まる補正が可能になる。

【0032】

【数9】

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = A_0 \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + b_g - A_0 \cdot a_g$$

【0033】歪み評価値  $\varepsilon$  が許容誤差値  $\delta$  内に収まらない残りの分割空間  $S_2, S_3, S_4$  については、次のステップに進む。

（第3ステップ）これらの分割空間  $S_2, S_3, S_4$  についても、既に第1次アフィン変換子  $A_0$  で変換されている。このとき、アフィン変換式の決定と歪みの評価では、転写図芯の転写図芯は、 $a$  ではなく、 $A_0 a$  を用いる。以下の議論では、分割空間  $S_2$  を例にとる。即ちアフィン変換式の決定には、 $b^k - A a^k$  に代わって、 $b^k - A(A_0 a^k)$  を用いて、関数  $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$  を下記数10とおいて、最小二乗法でアフィン変換子  $A$  を決定する。

【0034】

【数10】

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{k=1}^4 \{ (b_x^k - (\tilde{a}_x^k x_1 + \tilde{a}_y^k x_2))^2 + (b_y^k - (\tilde{a}_x^k x_3 + \tilde{a}_y^k x_4))^2 \}$$

$$\text{但し } A_0 a^k = \begin{pmatrix} \tilde{a}_x^k \\ \tilde{a}_y^k \end{pmatrix} \text{ とする。}$$

【0035】また、歪み評価値  $\varepsilon$  は、下記数11により求める。

【0036】

【数11】

$$\varepsilon = \sup_{a \in S_2} \| A(A_0 a) - b \|$$

【0037】こうして得られたアフィン変換子  $A$  を  $A_1$  とすると、分割空間  $S_2$  におけるアフィン変換子  $A^{(2)}$  は、次式で表される。

【0038】

【数12】

$$\text{任意の } \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \in S_1 \text{ に対して}$$

$$A^{(2)} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = A_1 \left( A_0 \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \right) = (A_1 A_0) \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

【0039】従って、 $A^{(2)} = A_1 A_0$ が成立する。このアフィン変換子 $A^{(2)}$ は、撮像全空間における第1次アフィン変換子 $A_0$ と、第1次分割された分割空間 $S_2$ における第2次アフィン変換子 $A_1$ の二つの変換子の合成である。ここで、図3A、Bに示すように、分割空間 $S_2$ を更に第2次分割（この場合も、縦横共に略1/2分割による空間の4分割であり、分割境界上に参照図芯2が並ぶ）し、得られた第2次分割空間 $S_{21} \sim S_{24}$ を、第1次及び第2次の合成変換後の歪み評価値 $\varepsilon_k$ （ $k=1, 2, 3, 4$ ）が指定許容誤差値 $\delta$ 内に収まる分割空間 $S$

$_{21}, S_{24}$ と収まらない分割空間 $S_{22}, S_{23}$ に分類する。許容誤差値 $\delta$ 内に収まる分割空間 $S_{21}, S_{24}$ では、アフィン変換子 $A^{(2)}$ によって歪み補正が可能である。許容誤差値 $\delta$ 内に収まらない分割空間 $S_{22}, S_{23}$ に対しては、以下更に同様の分割を繰り返す。以上により、一般に、第 $n$ 次分割された空間 $S_{x1 \times 2}, \dots, S_{xn}$ （ $x_k=1, 2, 3, 4, k=1, 2, \dots, n$ ）におけるアフィン変換子 $A^{(n)}$ は、次式ようになる。

【0040】

【数13】

$$\text{任意の} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \in S_{x1 \times 2, \dots, xn} \text{ に対して}$$

$$A^{(n)} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = (A_{n-1} \dots A_0) \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

【0041】このアフィン変換子 $A^{(n)}$ を作用させることにより、歪みを解消させる。以上の第1から第3のステップを踏むことにより、撮像空間の全ての点で位置誤差を指定許容誤差値 $\delta$ 内に収めることが可能になる。

【0042】具体的に上述したアルゴリズムを平面形状測定システムに適用した実施の形態を説明する。図4は、複数（図の場合3個）のCCDカメラ412a, 412b, 412cを用いて干渉縞画像を撮像して平面形状を計測する位相シフト法による干渉縞計測装置を示している。このような位相シフト干渉縞の同時計測装置の原理は、特開平2-287107号公報等に提案されている。レーザ光源401からのコヒーレント光束はレンズ402によりビームが拡大され、無偏光ビームスプリッタ403を介して、コリメートレンズ404によりコリメートされて参照面405に照射される。参照面405は一部反射、一部透過であり、その透過光束は更に1/4波長板406を介して被検面407に照射される。

【0043】参照面405と被検面407の反射光は、1/4波長板406により偏光が直交する（即ち位相差180度）の無干渉光束として重ね合わせられて、ビームスプリッタ406で反射される。この無干渉光束は、参照面405からの反射光（参照光）の位相に対する被検面407の反射光（試料光）の位相の差という形で被検面407の平面形状情報を持つ円偏光光束である。この無干渉光束は二つの無偏光ビームスプリッタ408a, 408bと全反射ミラー408cにより順次1/2ずつ分割されて3つの分光光学系40a, 40b, 40cに入る。

【0044】分光光学系40aと40bは、3つの無干渉光束に90度ずつ位相差を与えるための例えば1/4波長板409aと1/2波長板409bを有し、また各分光光学系40a, 40b, 40cは、各分光光束の位相差情報を干渉縞強度情報にするための偏光板410a, 410b, 410cを有する。これらの偏光板410a, 410b, 410cは偏光方向が45度ずつ傾斜している。これにより、各分光光学系40a, 40b, 40cのCCDカメラ412a, 412b, 412cにより、90度ずつ位相シフトした、試料光と参照光の3つの干渉画像が撮像される。なお減衰板411a, 411bは各分光光学系40a, 40b, 40cでの受光強度を等しく保つために挿入されている。

【0045】CCDカメラ412a, 412b, 412cにより撮像された位相の異なる3つの干渉縞情報は、画像処理装置413に入力され、制御コンピュータ414とモニター415により制御されて所定の演算により被検面407の形状情報を算出する。具体的にこの実施の形態の場合、3つのCCDカメラ412a, 412b, 412cから、撮像空間の各位置 $(x, y)$ に対してそれぞれ干渉縞情報 $I_1(x, y)$ が得られるが、各CCDカメラ412a, 412b, 412cとそれらに前置される光学要素により撮像空間に幾何学的歪みが生じるので、撮像空間の各位置 $(x, y)$ の干渉縞情報 $I_1(x, y)$ は必ずしも同じ位置に対する干渉情報ではない。そこで幾何学的な歪みを解消して、撮像画像の各位置 $(x, y)$ の干渉縞情報 $I_1(x, y)$ が被検面407の同じ位置に対する干渉情報となるように補正を加

えるが必要になる。

【0046】そこで、上述した(1)～(3)のアルゴリズムを適用する。得られた3つの撮像空間 $l=1, 2, 3$ の分割空間を $S^l_k$  ( $k=1, \dots, n_l$ )として、各分割空間におけるアフィン変換式を下記式のようにおく。

【0047】

【数14】

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = A^l_k \begin{pmatrix} X^l \\ Y^l \end{pmatrix} + b^l_{x^k} - A^l_k a^l_{x^k}$$

$$\begin{pmatrix} X^l \\ Y^l \end{pmatrix} = A^{l_k-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - b^l_{x^k} + A^l_k a^l_{x^k} \quad (X^l, Y^l) \in S^l_k$$

【0050】従って被検面407の各位置 $(x, y)$ に対応する3つの撮像空間 $l$ の干渉情報は、上で求められた座標値 $(X^l, Y^l)$ における干渉縞情報 $I_l(X^l, Y^l)$ で与えられる。以上のようにして、CCD撮像画像の幾何学的歪みを解消した、被検面の同じ位置に対応する3つの撮像装置の干渉縞情報(光強度値)が得られる。

【0051】

【発明の効果】以上述べたようにこの発明によれば、被計測空間とCCD撮像空間との幾何学的歪みを所定の許容誤差値内で容易に解消することができ、複数の光学系と対応するCCDカメラを利用する平面形状計測や座標位置計測等の高精度化が期待できる。またこの発明によると、光学系や撮像系を変更しない限り、領域毎に最終的なアフィン変換子を作用させる準備をしておき、撮像画像情報を得る度にそのアフィン変換子を画像情報の処理の最初の段階で各領域に作用させればよいので、時間

【0048】数14において、 $b^l_{x^k}$ ,  $a^l_{x^k}$ はそれぞれ、 $S^l_k$  ( $k=1, \dots, n_l$ )における原図芯、転写原図芯を表す。次に、参照空間の各座標値 $(x, y)$ に対応する3つの撮像空間 $l$ のそれぞれの座標値 $(X^l, Y^l)$ は、下記式で与えられる。

【0049】

【数15】

的にも計算コストが少なく済む。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明における参照空間と撮像空間の関係を示す図である。

【図2】 この発明におけるアフィン変換と許容誤差値の関係を示す図である。

【図3A】 この発明における参照空間の空間分割の例を示す図である。

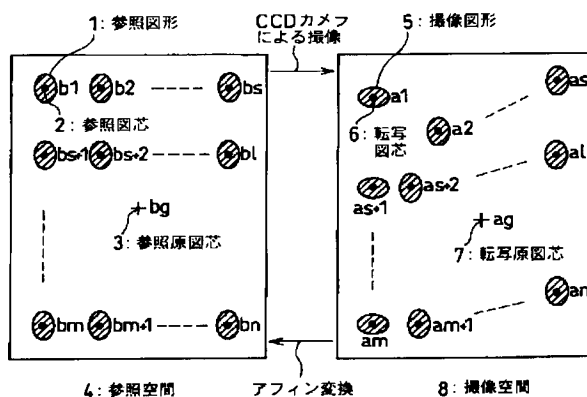
【図3B】 同じく撮像空間の空間分割の例を示す図である。

【図4】 この発明が適用される干渉縞画像撮像システムを示す図である。

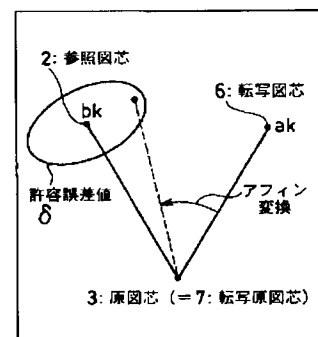
【符号の説明】

1…参照図形、2…参照図芯、3…参照原図芯、4…参照空間、5…撮像図形、6…転写図芯、7…転写原図芯、8…撮像空間。

【図1】



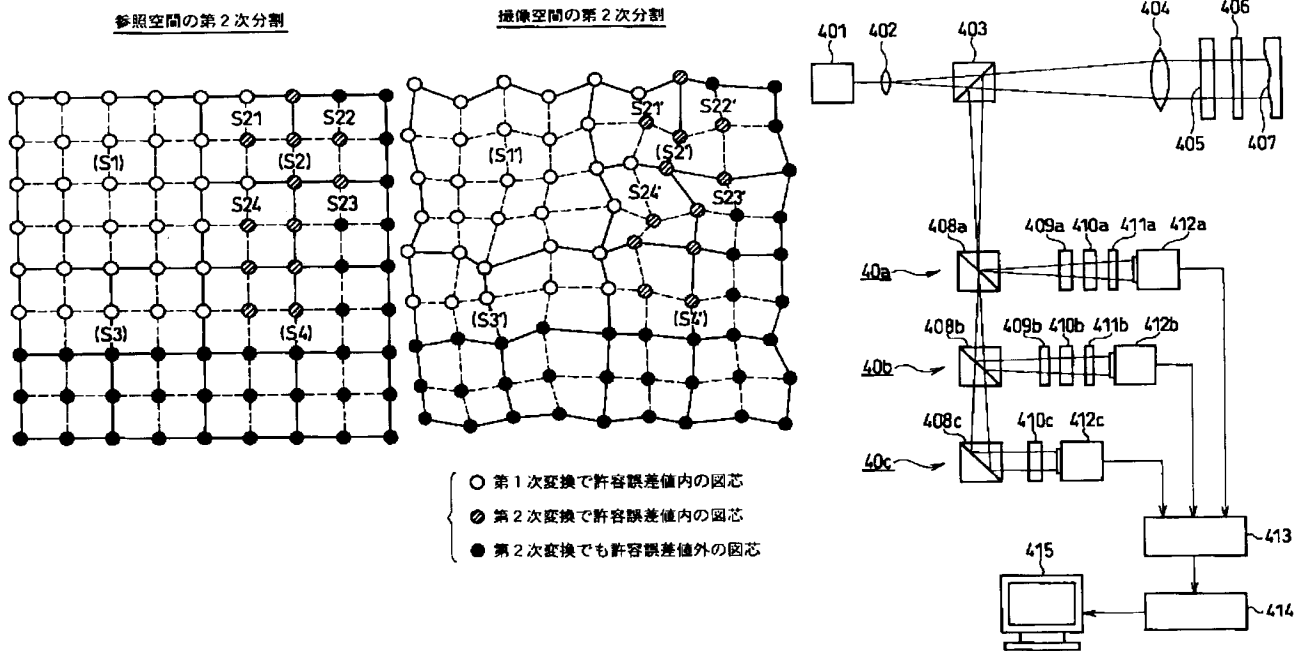
【図2】



【図3A】

【図3B】

【図4】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA04 DD00 DD03 FF04 JJ03  
JJ16 JJ26 QQ08 QQ25 QQ29  
RR07  
5B056 AA04 BB01 BB11 BB64 HH03  
5B057 AA20 BA02 CA12 CA16 CB12  
CB16 CD12 DA07 DB02 DC33